

## 論文の内容の要旨

論文題目	監視カメラの映像解析による地震動の推定
学 位 申 請 者	横田 有光

近年、高密度な地震観測網の必要性の認識が高まっており、様々な機関が地震観測網を整備している。例えば、日本国内では、(独)防災科学技術研究所、気象庁及び地方自治体等が全国規模の観測網の整備を進めており、それぞれの観測網をあわせると、現在、全国で4000か所以上、約5~20km間隔で地震計が設置されている。しかし、地震計のような専用の観測装置による観測網は、今以上の高密度化には限界がある。一般に地震動は、表層地盤の振動特性の違い等の影響を受け、局地的(数十~数百メートル単位)に変化するため、地震計による観測網だけでは、こうした局地的に異なる地震動の全容を十分に把握することができない。

そこで、本論文では、地震計による観測網を補うための手法として、一般の店舗等に設置されている監視カメラの映像を解析することにより地震動を推定する手法を提案する。監視カメラは、近年普及が進み、様々な施設に設置されており、地震計と比較して高密度に存在する。また、映像として記録が残るため、時間的に変化する地震動を地震波形データとしてとらえることができる可能性がある。提案手法では、大きな地震の際に室内の備品等に生じる様々な種類の運動のうち、滑り運動に着目する。滑り運動に着目することより、特殊な装置を用いず、一般の店舗等の監視カメラの映像から地震動を推定できる。

本論文は、まず、地震動の特性や既存の観測手法について述べ、本研究の位置づけについて述べる。ここでは、まず、地震動観測の歴史を地震計の広ダイナミックレンジ化・広帯域化・高密度化という切り口から概観する。次に、地震計による地震観測網では不足する観測密度を補うために、現在実際に用いられている手法である墓石の転倒調査やアンケート震度調査の地震動推定方法とその問題

点について述べる。そして、近年提案されている監視カメラの映像から地震動を推定する既存の手法を紹介する。このうち、カメラ自身の揺れ方から地震動を推定する手法は、カメラの共振の影響で推定可能な周波数帯域が制限される点が課題であり、カメラの前に設置した振り子の揺れ方から地震動を推定する手法は、振り子という特殊な装置が必要である点が課題である。提案手法は地震の際に物が滑る現象を利用しているため、カメラ自身の揺れ方から地震動を推定する手法のように、カメラの共振の影響で推定可能な周波数帯域が制限されないという点で優れている。また、多くの環境で滑る物体が存在するため、カメラの前に設置した振り子の揺れ方から地震動を推定する手法のように、予め特殊な装置を設置しなければならないという問題もない。

次に、提案手法である監視カメラの映像解析による地震動推定法の詳細を述べる。大きな地震の際には、室内の備品等の被写体は、転倒や落下等、様々な種類の運動をするが、提案手法では、滑る物体の運動に注目する。本章では、まず、地震動と滑り運動の間の物理的関係を明らかにし、滑り運動から地震動を逆解析する基本的な考え方について述べる。次に、画像から滑り運動を求める具体的な画像解析手法について述べる。提案手法では、画像解析により滑り運動する物体及び床面の動き情報を検出し、両者の差から滑り運動する物体の床面に対する相対速度を求める。ここでは、特徴点検出、テンプレートマッチング、動きベクトルの外れ値除去というシンプルな処理の組み合わせで、転倒や落下をする物体が存在する中でも滑り量が最大の滑り運動する物体及び床面の動き情報を選択的に求めるアルゴリズムを開発した。

提案手法の評価実験を行った。まず、縮尺模型を用いた振動台実験により、滑り運動する物体及び床面の動き情報を抽出可能であることを確認するとともに、地震動推定値を定量評価した。その結果、計測震度の最大誤差0.23、地震波形の実測値の推定値の間の相関係数0.8~0.91であったことを示す。次に、実際の地震で観測された地震波形データを用いたシミュレーション実験により、摩擦係数と推定可能な下限震度の関係、映像の時間・空間解像度と推定結果の関係、動摩擦係数の誤差が推定値に与える影響、上下動成分の誤差が推定値に与える影響を評価し、提案手法の原理的な誤差・適用限界を明らかにする。最後に、実際の地震の際の監視カメラの映像に提案手法を適用した例を示す。

提案手法は、既存の監視カメラを用いて、大きな地震の際の地震動を地震波形として取得可能であり、また、その地震波形から一定の精度で計測震度を算出可能であるため、既存の地震動推定手法である墓石の転倒調査やアンケート調査と並ぶ新たな推定手法として用いることができる。地震計を用いずに地震動を推定する手法は、精度は地震計より劣ることを許容しつつ、高密度な観測データを取得することが期待されており、提案手法はこのような推定手法の1つとして用いることができる。

# 論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 横田 有光

審査委員主査 古賀 久志

委員 多田 好克

委員 大森 匡

委員 田中 健次

委員 工藤 俊亮

大規模地震では地震動は局地的に変化するため、その全容究明には地震計が設置されていない場所でも震度が把握できることが望ましい。このような要求に対し、現状では震度推定に墓石転倒率調査やアンケートが実施されることが多い。しかし、墓石転倒率調査は墓石の耐震化が進むなどの社会的な要因により、今後は実施困難になると考えられる。アンケート震度は回答の分散が大きく信頼性が低い。さらに、これらの手法では地震波形を求めることができないという大きな欠点がある。そこで、本研究は監視カメラ映像から地震動を推定することを提案している。監視カメラは、例えばコンビニエンスストアなど一般の店舗にも存在し、地震計よりも高密度に存在する。さらに、今後、監視映像が高解像度化するのも確実であり、監視カメラベースの地震動推定は将来に渡って有望な手法であると言える。カメラ映像から震度推定する手法は、本研究以前に数件提案があるが、振り子などの特殊装置を必要であったり、カメラの固有周波数の振動しか測定できないという制限事項があった。提案手法では、監視カメラ映像内の物体のすべり運動から地震動推定を行う。提案手法は特殊装置を必要とせず、測定可能な周波数帯域が幅広いという点で汎用性の高さと従来手法より優れている。さらに、既存研究よりも実験評価を詳細に行ったことが特筆すべき点であり、測定地震波形と正解地震波形の相関性まで評価した初の研究である。

第1章では、本研究の背景、目的が述べられている。現在、設置されている地震計の密度(数km毎)と地震動の局地的変動の範囲(数十～数百m毎)を比べて、地震計の設置密度が不足していることを客観的に示し、それを補う手法の重要性を説明している。

第2章では、地震計が設置されていない箇所で地震動を推定する従来手法に言及している。墓石転倒率やアンケート震度の限界を述べ、次にカメラ映像

を利用する従来手法に対する先述の制限事項を述べている。このように、提案手法が従来手法に対し、仕様の観点で優位性を持つことが明確に示されている。

第3章では提案手法を詳細に記述している。提案手法では、映像内のすべり物体に注目して震度推定を行う。具体的にはまず、特徴点をテンプレートマッチングで追跡し、物体の動きヒストリを得る。一般に地震が発生すると、物体はすべらないで、落下・転倒することもある。そこで本論文では、回転に対応するテンプレートを用意しないことで、転倒、落下などの回転を含む動きを追跡せず、すべり運動のみを選択的に追跡する単純かつ効果的な手段を開発した。その次にキャリブレーションで求めたカメラパラメータを用いて、映像空間における物体の動きを3次元実世界の動き(速度)に変換する。それから、すべり量最大の物体とすべり最小の物体である床を検知し、それらの動きの差を取ってカメラの揺れを相殺して、すべり物体の動きを抽出する。最後に、運動方程式から地震加速度を算出する。なお、運動方程式における動摩擦係数は実際に測定するか、或いは推定値を使うことを想定している。2物体の動きの差を取りカメラの揺れを相殺するというアイデアは、本研究の独創的な点である。

第4章では、提案手法を実験評価している。まず、振動台を用いた実験において地震加速度波形を推定し、正解加速度波形と周波数が一致し、相関係数0.8以上を達成することを示した。既存の監視カメラベースの地震動推定手法では推定加速度波形と正解加速度波形の周波数が異なっており、本成果は提案手法の精度の高さを裏付けている。推定震度の誤差も0.23以下に抑えられている。さらに、振動台では地震動の特性を完全には再現できない事を考慮し、実際の地震波形を用いたシミュレーション評価を行った。それにより、提案手法の有効性を示す一方で、性能限界も明らかにした。具体的には、提案手法で推定可能な震度の下限値および、カメラのフレームレート・空間解像度・動摩擦係数誤差が推定値に及ぼす影響を明らかにした。例えば、提案手法では震度が小さすぎると物体がすべらず推定が行えないが、震度5弱以上であれば使用可能である。従って、提案手法は被害の大きな地震の全容解明に貢献できる。最後に、実際の地震時のテレビ映像に提案手法を適用し推定震度が妥当な値になることから、提案手法が現実の地震動を解析するポテンシャルを持つことを示している。

第5章では、結論と今後の研究の方向性が述べられている。

以上より、提案手法は、ありふれた監視カメラから地震動を地震波形として取得可能で、測定可能な周波数帯域が幅広いという点で、同様な目的の従来手法よりも汎用性が高い。また、推定精度に関しても実験的に有効性を示している。さらに手法の評価も、従来研究より詳細になされており、相関係数により地震波形の精度の高さを示している。よって、本論文は、情報工学的な立場から地震学の進歩に貢献しており、博士(工学)の学位論文として十分な価値を有するものと認める。